

STRUKTUR SHELL PADA Il Palazzetto Dello Sport, Italia

Abstraksi

Il Palazzetto Dello Sport, sebuah bangunan olahraga tertutup yang memiliki bentuk terlihat yang sederhana namun memiliki sistem struktur yang cukup kompleks. Atap kubahnya yang mendominasi visualisasi bangunan memiliki permukaan yang halus, bersih dan berkualitas tinggi. Terlihat jelas kubah membulat (*spherical*) nya yang merupakan jenis *dome shell* didukung oleh penopang beton berbentuk huruf Y. Bagian puncak kubah dilubangi hingga terbuka dan ditutup oleh sebuah atap kubah yang lebih kecil. Pada bagian dalam, di bawah kubah terpasang dinding kaca yang luas di sekeliling tribun penonton. Bangunan ini memiliki delapan pintu masuk di sekeliling denahnya yang bulat. Pada bagian bawah tiap beton penyangga yang berbentuk Y terdapat masing-masing satu kaki (kolom) vertikal yang membuat sistem penyangga yang stabil. Keunikannya yaitu tepi atap kubah yang bergelombang. Perancangannya memiliki kemampuan untuk memadukan aspek struktural dan arsitektural sehingga saling melengkapi. Hasilnya adalah sebuah bangunan yang megah, indah dan kokoh berdiri dan terawat selama hampir setengah abad hingga saat ini.

PENDAHULUAN

Struktur adalah sarana penyaluran beban dan akibat penggunaan dan kehadiran bangunan kedalam tanah. Studi tentang struktur menyangkut pemahaman prinsip-prinsip dasar yang menunjukkan dan menandai perilaku objek-objek fisik yang dipengaruhi oleh gaya. Bangunan harus mampu menghadapi gaya-gaya vertikal gravitasi dan gaya-gaya horizontal angin di atas tanah serta gaya-gaya gempa di bawah tanah. Kulit bangunan harus menahan perbedaan suhu, tekanan udara, dan kelembaban antara lingkungan luar dan dalam bangunan. Susunan batang-batang harus dapat menyerap gaya-gaya ini dan meneruskannya dengan aman ke tanah dengan usaha sesedikit mungkin ¹.

Struktur dirancang untuk berfungsi sebagai kesatuan secara keseluruhan dan sebagai serangkaian unsur yang berbeda-beda. Acuan kepada jenis-jenis beban yang diperkirakan disertakan untuk menampilkan pentingnya kenyataan bahwa struktur itu biasanya dirancang terhadap sekumpulan kondisi beban tertentu dan berfungsi sebagai struktur terhadap kondisi-kondisi ini. Unsur-unsur struktur adalah tulang punggung yang penting untuk “badan” bangunan, dan seorang arsitek yang mampu mengendalikan unsur-unsur struktur dan menampilkannya untuk mengungkapkan hakikat bangunanlah yang dapat mengidentifikasi dan mencerminkan tujuan pembangunannya sebagai suatu wadah untuk interaksi berbagai sistem kegiatan yang berbeda ².

^{1, 2} Schueller, Wolfgang. **Struktur Bangunan Bertingkat Tinggi**. PT Refika Aditama. Bandung : 2001

STRUKTUR SHELL

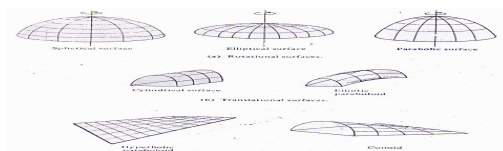
Pada dasarnya shell diambil dari beberapa bentuk yang ada di alam seperti kulit telur, tempurung buah kelapa, cangkang kepiting, cangkang keong, dan sebagainya (Curt Siegel).

Suatu struktur shell harus mempunyai tiga syarat, yaitu :

- Memiliki bentuk lengkung (curved)
- Relatif tipis terhadap permukaan atau bentangnya
- Dibuat dari bahan yang keras, kuat,

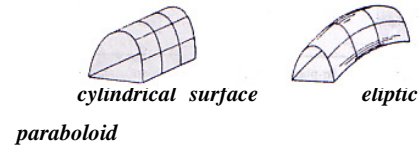
Sesuai dengan terjadinya bentuk shell, maka shell digolongkan dalam tiga macam:

1. Rotational Surface, diperoleh bilamana suatu garis lengkung yang datar diputar terhadap suatu sumbu, dapat dibagi menjadi tiga yaitu :



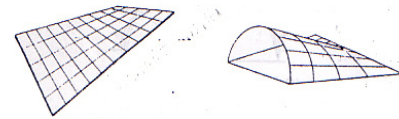
Spherical Surface
Elliptical Surface *Parabolic Surface*

2. Ruled Surface, bilamana ujung-ujung suatu garis lurus digeser pada dua bidang sejajar, dapat dibagi menjadi dua yaitu :



cylindrical surface *elliptic paraboloid*

3. Translational surface diperoleh jika suatu garis lengkung yang datar digeser sejajar diri sendiri terhadap garis lengkung yang datar lainnya, dapat dibagi menjadi dua yaitu :



Hyperbolic Paraboloid *Conoid*

Sesuai dengan lengkung permukaan, dibagi menjadi

1. Single Curved Shell, yang arah lengkungannya dalam satu arah serta permukaannya tidak diputar/digeser, dan dibentuk oleh konus yang sama.
2. Double Curved Shell, yaitu shell dengan arah lengkungannya dalam dua arah, terdiri dari 2 macam:
 - Synclastic shells
 - Anticlastic shells

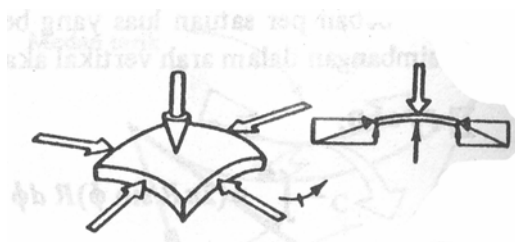
DOME SHELL

Kubah modern dalam skala struktur yang besar dibangun dari kubah rangka

besi yang bervariasi pada pertengahan abad 19, khususnya kubah Schwedler. Membran bola merupakan kasus khusus dari kelompok bentuk aksis simetris yang permukaannya didefinisikan oleh radius konstan dari kelengkungan. Gaya axial dalam membran bola yang disebabkan oleh gaya aksi seragam normal pada permukaan adalah konstan pada titik manapun pada permukaan.

Seperti yang terjadi pada struktur-struktur lain, kondisi tumpuan kubah sangat mempengaruhi perilaku dan desain struktur. Secara ideal, tumpuannya tidak boleh menimbulkan momen lentur pada permukaan membran. Berdasarkan tinjauan kemudahan konstruksi, mimen lentur (yang tidak besar) biasanya boleh terjadi di tepi cangkang mudah dilaksanakan. Cangkang diperkaku secara lokal (biasanya dengan cara menambah ketebalannya) di sekitar tepi, dan khususnya diperkuat terhadap lentur.

Pada diagram benda-bebas di



puncak elemen cangkang. Semua gaya internal dalam bidang harus berupa gaya tekan agar keseimbangan elemen dalam arah vertikal terpenuhi.

Gaya melingkar pada cangkang bola

Cara untuk mengatasi gaya horizontal adalah dengan menggunakan cincin tarik, yang berupa planar yang menahan dorongan keluar dari cangkang.

Cincin tarik yang

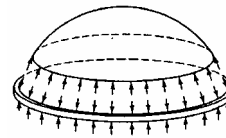
digunakan harus

menerus

disekeliling

cangkang. Hanya gaya horizontal ke

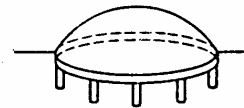
bawah yang disalurkan ke tanah.



Penggunaan cincin tarik dalam menahan gaya horizontal

Cangkang yang menggunakan cincin tarik dapat ditumpu oleh kolom-kolom karena di bawah cincin hanya ada gaya vertikal yang

harus



disalurkan ke tanah.

Penggunaan cincin tarik yang ditumpu oleh kolom

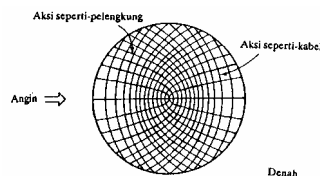
memerlukan sistem penyokong atau buttresses. Penyokong (buttresses) komponen vertikal dan horizontal dari

gaya meridional dapat dipikul oleh penyokong. Penyokong ini harus dapat menahan gaya dorong ke luar yang terjadi.



Sistem penyokong pada cangkang bola

Masalah lain yang juga harus diperhatikan adalah cangkang harus mampu juga menahan beban-beban yang berarah tidak vertikal. Biasanya beban angin bukan merupakan masalah kritis dalam desain struktur cangkang. Beban gempa, yang juga berarah lateral seperti beban angin, dapat menimbulkan masalah serius dalam desain. Pada gambar di bawah ini dapat kita lihat bagaimana ilustrasi trajektori tegangan pada kubah bola akibat beban angin.



Trajektori tegangan pada kubah belahan bola akibat beban angin

HYPERBOLIC PARABOLOID

Hyperbolic Paraboloid yang sering disebut dengan hypar atau h-p (HP), adalah permukaan translasional, bukan permukaan putaran; dengan memotong permukaan secara vertikal menghasilkan parabola, sedangkan secara horisontal

membentuk hiperbola. Berdasarkan bentuk tepinya, hypar dapat dibagi menjadi:

1. Hypar with Curved Edge
2. Hypar with Straight Edge

SHELL SILINDRIS

Shell silindris dengan lengkungan tunggal dapat tersusun dari berbagai tipe kurva yang berbeda. Kurva dasar mulai dari bentuk geometri tertentu dari tembereng lingkaran, parabola, elips, hiperbola dan cycloid sampai dengan bentuk geometri yang luwes dari garis funicular.

Tinjauan Kasus

il Palazzetto Dello Sport

Roma, Italia

Arsitek Annibale Vitellozzi Insinyur struktur Pier Luigi Nervi Kontraktor umum Nervi dan Bartoli Dibangun tahun 1957 untuk ajang Olimpiade Tahun 1960.



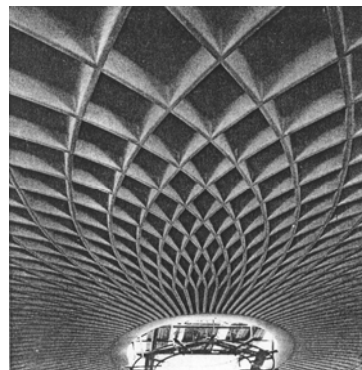
GEOMETRI & KONSTRUKSI

Bangunan ini merupakan karakteristik desain dari P. L. Nervi. Terlepas dari kualitas keseluruhan bangunan ini yang sangat tinggi, bangunan ini dapat dikategorikan bangunan yang logis dan fungsional. Problem fungsional dalam menyediakan sebuah bangunan yang dapat menampung 4000 supporter untuk menonton pertandingan basket atau tenis menjadi faktor utama yang mempengaruhi seluruh keputusan dalam proses perencanaan, perancangan, struktur, peralatan dan juga biaya.

Salah satu cara untuk menyederhanakan konstruksi, dan mengurangi biaya, yaitu dengan cara repetisi elemen struktural. Untuk beton, repetisi dapat dibuat dengan pemakaian kembali (re-use) dari cetakan-cetakan atau elemen-elemen pra-pabrikasi, dimana potongan-potongan pra-pabrikasi dari tiang-tiang beton disambung pada bagian akhir ke bagian akhir yang lain dengan cara mengelas batang-batang beton bertulang, yang dibiarkan menonjol ke luar, lalu dituangkan adonan beton di sekeliling pertemuan (sendi) - (lihat gambar di samping ini). Prosedur ini membutuhkan rangka untuk sendi dan juga tangga perancah untuk menyokong elemen-elemen pra-pabrikasi. dibutuhkan pekerjaan beton yang sangat hati-hati di lapangan, sejak saat beton "cetakan di tempat" di letakkan pada titik yang paling

rawan. (sebenarnya, kecemasan teoritis tentang kombinasi dari "cetakan di tempat" dengan beton pracetak telah dibuktikan tidak membutuhkan alas/ tanpa dasar/ penopang, karena keseluruhan rangka struktur atap ini masih bisa berdiri sendiri).

Eksperimen yang dilakukan oleh perancangnya dengan rangka beton menunjukkan penemuannya berupa beton bertulang kualitas tinggi yang dinamakan *ferro-cemento*. Kuantitas dari bajanya sekitar delapan kali lebih baik dibandingkan dengan beton bertulang biasa, namun produk akhirnya merupakan material yang homogen. Dengan menggunakan *ferro cemento*, dia kemudian mengembangkan sebuah elemen pra-fabrikasi jenis baru, yaitu kotak berbentuk agak melengkung yang memiliki tepi, disebut juga panel *shell*.



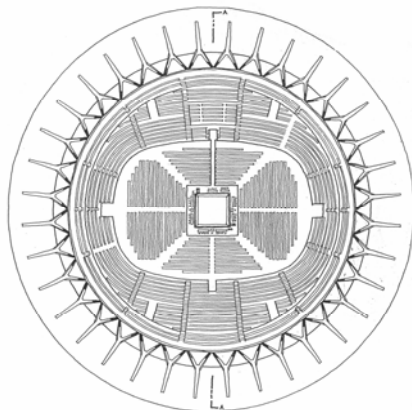
Gb. 4 Pola ekspos atap kubah.

Panel tersebut dibuat dari beton dan hanya memiliki ketebalan sekitar 1 inci (2.54 cm). Ruang-ruang sisa dari tepi masing-masing panel membentuk cetakan dimana bentuk rangka menerus pada permukaan interior atap dapat dituang (di

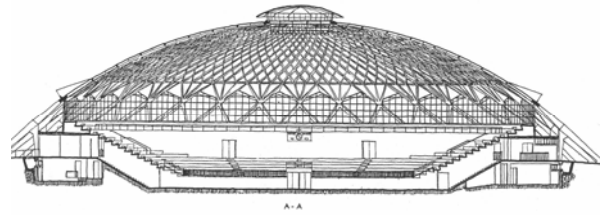
cor) di tempat, direkatkan dengan elemen (beton bertulang) pra-pabrikasi dengan cara mengekspos beton bertulang tersebut dan dibuat menerus (bersambungan) dengan cetakan di tempat (*cast in place*) dan elemen pra-fabrikasi. Ikatan antara beton cetak di tempat dengan elemen pra-fabrikasi yang bagus dan kuat dapat dicapai dan tidak ada kecenderungan menjadi terpisah-pisah (berlapis). Seluruh pertemuan berperilaku seperti satu kesatuan. Kulit permukaan diperlukan untuk mendukung elemen pra-fabrikasi.

Untuk memasang elemen pra-fabrikasi, permukaan yang akan dibangun harus di bagi per sub-sub bagian menjadi sejumlah area identik atau sekumpulan area, dalam kasus ini berbentuk berlian atau disebut bentuk *lozenge*. Pola yang dihasilkan disebut **sistem diagrid atau lamella**.

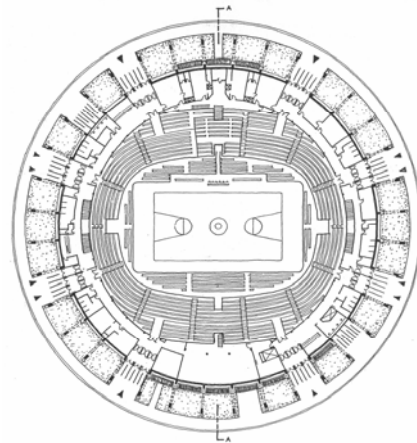
Di sini perancang mengikuti prinsip yang radial, yang telah menjadi kunci dimana bentuk permukaan bulat dapat dibangun pada masa lalu dan yang merespon gaya gravitasi dengan lebih baik (lihat gambar denah dan potongan di bawah ini).



Gb. 6. Denah Tribun



Gb. 7. Potongan



Sudut-sudut dari panel-panel itu semua menghasilkan garis-garis geodesik yang menyambung dari atap hingga tepi, bagaikan garis-garis bujur bumi. Garis-garis tersebut juga saling paralel dan mengingatkan pada garis-garis lintang bumi.

Pada Little Sports Palace, lapisan kubah dibagi menjadi empat zona, yaitu :

1. *Oculus*, pada bagian puncak kubah yang diatapi oleh atap *concrete-shell* nya sendiri (disebut juga *cupola*)
2. Area utama atap dibagi ke dalam 27 garis radial tiap perempat lingkaran dan dibangun dari panel-panel berbentuk ketupat (13 ukuran yang berbeda yang dibutuhkan,

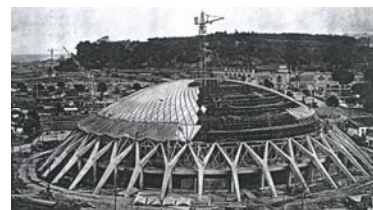
menghubungkan dengan garis lintang lingkaran), (lihat gambar 4).

3. Tepi atap yang bergelombang bersatu tiap tiga garis radial pada area yang utama ke dalam titik tunggal (enam ukuran panel yang berbeda diperlukan).
4. Gaya di sembilan poin-poin perempat lingkaran kini digantikan oleh sembilan rangka bentuk Y atau penyokong, masing-masing dengan dua lengan, yang merupakan suatu ciri khas perancang dalam pengaturan struktur, dan dibawa disalurkan ke *tension ring* dari beton prategang yang besar dan tersembunyi agak di bawah permukaan tanah. Dengan pengaturan bentukan bola yang sederhana ini secara struktur dibawa dari sudut bangunannya ke dalam bumi tetapi, secara visual, kubah tampak mengapung di udara.

Salah satu cara untuk memahami struktur adalah dengan membayangkannya sebagai sebuah bidang yang ada di atas tanah seperti cangkir terbalik, dengan bagian bawahnya terpotong seperti cincin. Cincin penegang (*tension ring*) ini memiliki dua kegunaan, untuk menancapkan bangunan pada permukaan tanah dan untuk mengalirkan beban agar merata pada tanah.

Seluruh struktur *Little Sports Palace* adalah pra-pabrikasi kecuali kolom penopang dan cincin penegang. *Sequence-*nya dapat dilihat pada gambar 9. Cincin penegang, yang juga merupakan

sambungan dari kolom penopang, sudah selesai dibuat dalam bentuk pra-tegang sebelum pekerjaan lainnya dilakukan. Bentuk dari kolom penopang diperpanjang dan diletakkan satu persatu di sepanjang garis batas; kaki vertikal di tiap bagian bawah kolom penopang membuatnya stabil dan bisa berdiri sebagai elemen terpisah. Pada gambar 8, tulangan kolom penyangga di sebelah kanan menonjol dari bagian atas lengan kolom, dan siap dimasukkan pada rangka antara panel pra-fabrikasi dari atap yang berombak. Bersamaan dengan diperpanjangnya panel, balok penguat diletakkan pada rangka, dan balok panel tersambung dengan benar, kemudian balok penguat dipasang sebagai sambungan permukaan pada beton, yang kemudian dipasang bersama dengan rangka. Gambar rencana (Gbr. 10) menunjukkan semua baja. Bagian yang besar melewati rangka (Gbr. 11) menunjukkan dengan detail bagaimana elemen – elemen dihubungkan dengan beton yang ditanam. Bagian *prefabricated* berbentuk *lozenge* merupakan beton penguat biasa, bukan penguat tingkat tinggi; lubang – lubang yang saling berhubungan pada bagian bawah memastikan permukaan yang bersih dan halus.

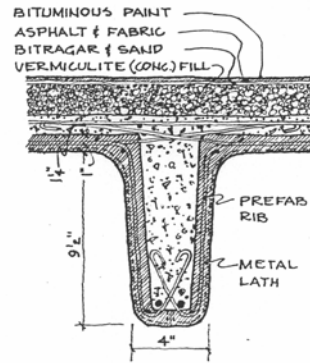


ANALISA STRUKTURAL

Struktur seperti ini – atau, untuk kepentingan tersebut, dengan berbagai jenis – tidak bisa dihitung sebelum bentuk dan perletakan elemen – elemennya ditentukan. Dengan ditetapkan bentuk geometrinya, analisa digunakan untuk mengetahui kekuatannya, untuk memastikan batas tingkat ketegangannya tidak melebihi batas, dan, tentu saja, untuk memastikan tingkat kestabilan struktur terhadap beban sistem dan beban bangunan, salju, angin, dsb.

Perhitungan tepat atas kekuatan ini memang tidak mungkin dilakukan dengan variabel material seperti beton. Akan sangat rumit bahkan untuk material yang elastis sempurna seperti baja, dengan anggapan bahwa semua elemen sudah sesuai satu sama lain tanpa adanya gangguan dari luar. Perkiraan solusi untuk kubah berbentuk bola masih memungkinkan, dan perhitungannya tidak terlalu rumit. Analisisnya berdasarkan pada anggapan bahwa permukaannya bersifat elastis sempurna dan bukan merupakan membran kaku, yang tahan terhadap gangguan dengan cara diregangkan atau ditekan dan bukan dilengkungkan. Jika kita ambil potongan dari permukaan, tegangannya dianggap konstan di seluruh ketebalan kubah pada bagian tersebut. Tapi kalau dilengkungkan, ketegangan maksimumnya

akan berbeda pada bagian permukaan satu dengan bagian permukaan lainnya.



Gb. 11. Potongan penulangan

Anggapan tentang sifat membran cukup beralasan pada struktur shell tipis, terutama jika tepinya ditopang secara menerus. Pada kasus ini, masalahnya menjadi rumit karena menggunakan rangka. Meski demikian, kita bisa menganggap rata rangka dengan papan di antaranya (lihat gambar di samping) dan menganggap shell dengan ketebalan seragam, dalam hal ini ± 13 cm.

Bangunan dengan diameter 65,83 m ini memiliki kaki-kaki penopang berbentuk Y sejumlah 36 buah. Penempatannya diatur dengan seimbang pada seluruh keliling batas kubah agar dapat menyalurkan beban dengan lebih merata. Sudut seluruh kaki penopang ini sebesar 40° dari permukaan tanah disesuaikan dengan lengkungan atap kubahnya. Pada bagian bawah permukaan tanah (tersambung dengan kaki penopang) terdapat tension ring (cincin tegang/ penarik) yang berfungsi sebagai pondasi

menerus yang meneruskan gaya horizontal ke tanah.

KESIMPULAN

1. Bangunan dengan diameter 65.83 m ini menggunakan struktur shell jenis *dome shell* tipis yang menggunakan cincin tarik dan penyokong.
2. Penempatan cincin tegang (*tension ring*). Biasanya cincin tegang (sebagai bagian batas dari kubah) berada di atas kolom penyangga, pada balok dinding, atau pada bagian tepi dari shell bentuk kerucut (*conical shell*). Terlepas dari perletakkannya, membuat tension ring jadi pra-tegang merupakan suatu keuntungan karena tegangan cincin dan kubah (*dome*) menjadi stabil dan konsisten.
3. Untuk Palazzetto ini dengan adanya cincin tegang di dalam tanah, sifat pra-tegangnya dapat berfungsi dengan lebih mudah dibandingkan jika ditempatkan di atas permukaan tanah, dan juga sebuah cincin (*ring*) yang lebih besar dapat digunakan tanpa merusak estetika bangunan atau terlihat aneh.
4. Ukuran *ring* yang besar juga berfungsi sebagai pondasi menerus yang menyebarkan beban secara merata. Meskipun permukaan yang berbentuk kubah secara struktural dibawa ke arah tanah, namun tetap mendapatkan cahaya alami dari bidang terbuka yang dihasilkan oleh kolom-kolom penyangga.
5. Karena yang digunakan adalah struktur shell yang tipis (dari panel-panel beton yang tipis), maka sebaiknya disangga secara merata pada seluruh batas dome. Hanya dengan ini maka kondisi aksi membrane shell dapat terpenuhi.
6. Pemilihan shell yang tipis dan memiliki tulang-tulang (*ribbed shell*) dibandingkan membran shell dengan ketebalan sama dianggap lebih mahal dan tidak efisien.
7. Rangka-rangka tulangan (*ribs*) tersebut memberikan tekstur dan skala pada interior permukaan atap. Gaya-gaya yang terjadi seharusnya sealur dengan rangka tulangan karena bagian penguat (*stiffer*) dari strukturnya akan menyokong beban yang paling berat.
8. Dengan adanya ekspos permukaan kubah bagian dalam, maka kita dapat merasakan kesan bahwa kita dapat “melihat” gaya-gaya yang bekerja.
9. Keseluruhan desain merupakan satu kesatuan yang saling mendukung aspek structural

(kekuatan bangunan) dan estetika
(keindahan).

D a f t a r P u s t a k a

Billington, David P. **Thin Shell Concrete
Structure.** McGraw-Hill Book
Company. New York : 1965.

Schodek, Daniel L. **Struktur.** PT Refika
Aditama. Bandung : 1998.

Schueller, Wolfgang. **Struktur Bangunan
Bertingkat Tinggi.** PT Refika
Aditama. Bandung : 2001.

www.arch.columbia.net

www.architecture.com

www.culturalgeneral.net

www.cyberguide.com